

# Planificación de la producción en un entorno multifábrica

Juan Luis García Dus  
gardus@alumni.uv.es

Universidad de Valencia  
Av. Blasco Ibañez, 13. 46010 Valencia, España.

12 de julio de 2018

# Introducción

## Situación actual de la industria

- Entorno global, complejo y en constante variación
- Consumidores exigentes
- Competencia voraz
- Necesidad de diferenciarse

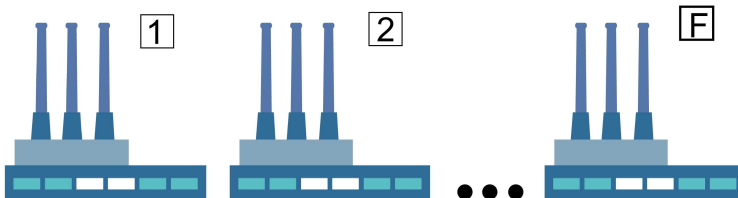
**Imprescindible usar nuevos modelos de producción**

# Introducción

## Nuevas formas de producción

- Red de fabricación distribuida
  - Parcialmente distribuida
  - Totalmente distribuida

## *Fabricación*



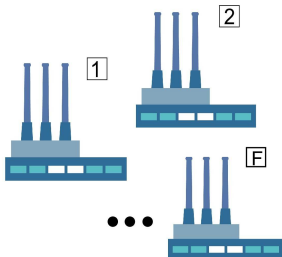
*Elaborado a partir de imágenes vectoriales de freepik*

# Introducción

## Nuevas formas de producción

- Red de fabricación distribuida
  - Parcialmente distribuida
  - Totalmente distribuida

*Fabricación*



*Transporte*



*Ensamblaje*



*Elaborado a partir de imágenes vectoriales de freepik*

# Introducción

## Planificación de la producción

- Programar la producción (*Machine Scheduling*)
- Controlar costes
- Determinar si es asumible la producción
  - Compromisos
  - Limitaciones
  - Metas
  - Riesgos

## Planificar la ejecución de la forma más óptima posible

- Minimizar  $C_{\text{máx}}$

# Contenido

## Estudio del...

- Entorno parcialmente distribuido
  - Problema DPFSP, minimizando  $C_{\text{máx}}$
- Entorno totalmente distribuido
  - Problema DAPFSP, minimizando  $C_{\text{máx}}$

## Objetivos

- Formulación adecuada de los problemas
- Análisis pormenorizado de modelos matemáticos
- Estudio de métodos heurísticos

# Índice

- 1 The Distributed Permutation Flowshop Scheduling Problem**
  - Formulación del problema
  - Modelos matemáticos
  - Rendimiento de los modelos
  - Métodos heurísticos
- 2 The Distributed Assembly Permutation Flowshop Scheduling Problem
  - Formulación del problema
  - Modelos matemáticos
  - Rendimiento de los modelos
  - Métodos heurísticos
- 3 Conclusiones

# Índice

- 1 The Distributed Permutation Flowshop Scheduling Problem
  - Formulación del problema
    - Modelos matemáticos
    - Rendimiento de los modelos
    - Métodos heurísticos
- 2 The Distributed Assembly Permutation Flowshop Scheduling Problem
- 3 Conclusiones

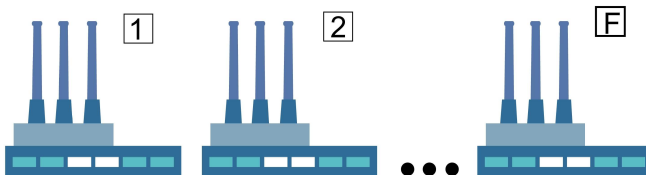


# Formulación del problema

## Objetivos

- Programar la ejecución...
  - De una serie de trabajos
  - En algunas, o en todas, las fábricas disponibles
- Minimizar  $C_{\text{máx}}$

## Fabricación



Elaborado a partir de imágenes vectoriales de freepik

# Formulación del problema

## Objetivos

- Programar la ejecución...
  - De una serie de trabajos
  - En algunas, o en todas, las fábricas disponibles
- Minimizar  $C_{\text{máx}}$

## Dos decisiones

- Reparto de los trabajos entre las diferentes fábricas
- Programación de la ejecución de las tareas en cada fábrica

# Formulación del problema: Particularidades

## $F$ fábricas

- Idénticas entre sí
- Con capacidad de procesamiento infinito
- Sin posibilidad de transferencia de trabajos entre fábricas

# Formulación del problema: Particularidades

## $n$ trabajos

- Disponibles para procesarse desde el instante cero
- Compuestos por varias subtareas sucesivas
  - Orden determinado
  - Tiempo de procesamiento definido e invariante
  - Cada subtask se realiza en una máquina diferente

# Formulación del problema: Particularidades

## $m$ máquinas

- Siempre disponibles
- Sin posibilidad de detenerse mientras procesan algún trabajo
- Sin capacidad de ejecutar varias subtareas a la vez
- No se cambia el orden de las subtareas al pasar de una máquina a otra

# Índice

- 1 The Distributed Permutation Flowshop Scheduling Problem**
  - Formulación del problema
  - **Modelos matemáticos**
  - Rendimiento de los modelos
  - Métodos heurísticos
- 2 The Distributed Assembly Permutation Flowshop Scheduling Problem
- 3 Conclusiones

# Modelos matemáticos

## Utilidad

- Resolver problemas de planificación de la producción pequeños
- Interés conceptual
- Sugerir estrategias, reglas o relaciones ocultas
- Permite experimentar cambios sin comprometer la producción

**Seis modelos estudiados**

# Modelos matemáticos

- 1 Modelo basado en la secuenciación
- 2 Adaptación de un modelo de Wagner para PFSP a DPFSP, basado en las posiciones que ocupan los trabajos
- 3 Modelo basado en las posiciones que ocupan los trabajos



# Modelos matemáticos

- 4 Basado en las posiciones que ocupan los trabajos, disgregando las dos decisiones fundamentales
- 5 Basado en la secuenciación de tareas a partir de la presencia de dummy jobs, que actuarán como separados entre fábricas
- 6 Adaptación del modelo de Manne para problemas JobShop, basado en la secuenciación de las tareas

# Índice

- 1 The Distributed Permutation Flowshop Scheduling Problem**
  - Formulación del problema
  - Modelos matemáticos
  - Rendimiento de los modelos**
  - Métodos heurísticos
- 2 The Distributed Assembly Permutation Flowshop Scheduling Problem
- 3 Conclusiones

# Rendimiento de los modelos

**Necesidad de valorar que modelo funciona mejor  
y bajo que circunstancias**

# Rendimiento de los modelos: Planteamiento

$\left[ \begin{array}{l} 36 \text{ problemas diferentes} \\ 5 \text{ instancias por cada tipo} \end{array} \right] \rightarrow 180 \text{ instancias en total}$

Factor del problema	Número de niveles	Valores
Número de trabajos a programar	4	4, 7, 10, 13
Número de fábricas disponibles	3	2, 3, 4
Número de máquinas	3	2, 4, 6

Tiempos de procesamiento aleatorios, tomados uniformemente sobre el conjunto  $\{1, 2, \dots, 99\}$

# Rendimiento de los modelos: Planteamiento

## Control total de las condiciones de computación

---

<b>CPU</b>	Intel Core i5-750 @2.67GHz
<b>Placa base</b>	Gigabyte P55A-UD4
<b>Memoria Ram</b>	Kingston 8+4GiB @1333MHZ
<b>Swap</b>	20GiB sobre SSD SanDisk Ultra II en SATA3
<b>Sistema Operativo</b>	Ubuntu 16.04 + Kernel 4.13.0-38-generic
<b>Notas</b>	<div> <div>{</div> <div> <p>La computación tiene lugar en tty1 con las X detenidas (<i>service lightdm stop</i>).</p> <p>El swappiness del núcleo de Linux se fija en 10 (<i>sysctl -w vm.swappiness=10</i>).</p> </div> <div>}</div> </div>

---

# Rendimiento de los modelos: Planteamiento

Control total de las condiciones de computación

Factor computacional	Número de niveles	Valores
Lanzador	1	R 3.4.4 x86_64-pc-Linux-gnu
Solver	1	CPLEX 12.7.1
Núcleos disponibles	2	3, 4
Tiempo disponible	2	300s, 1800s

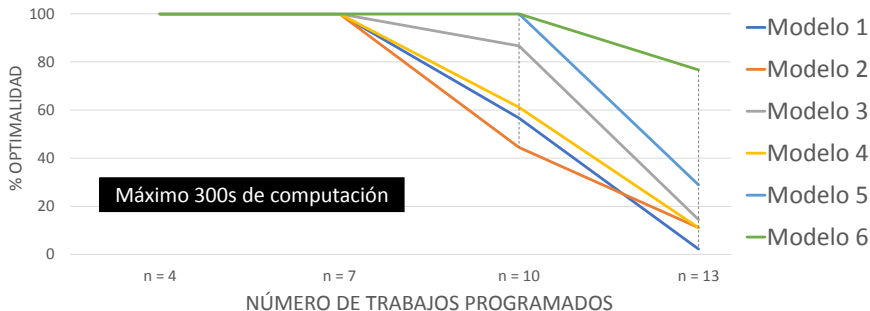
# Rendimiento de los modelos: Planteamiento

## Datos recogidos

- El tamaño del problema
- Las limitaciones computacionales impuestas
- El tiempo de computación dedicado
- Si CPLEX ha encontrado la solución óptima, o no
- El GAP alcanzado por CPLEX en su ejecución

# Rendimiento de los modelos: Análisis descriptivo

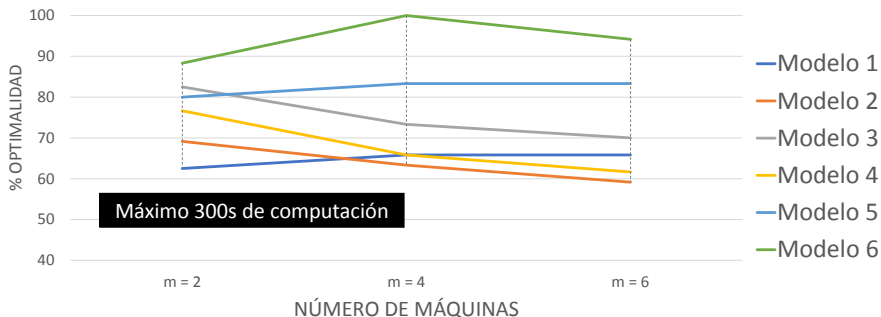
Tasa de optimalidad por modelo y número de trabajos





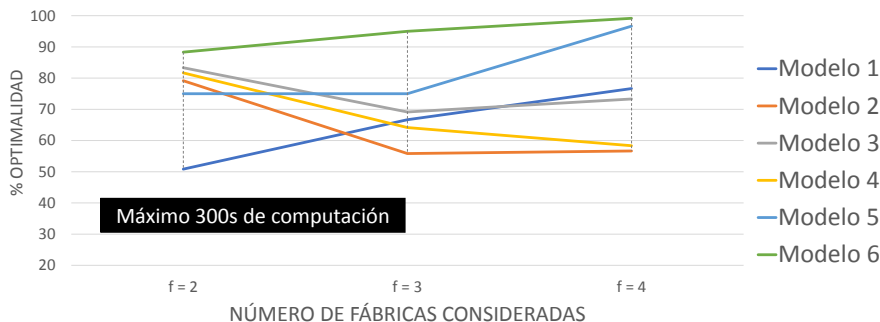
# Rendimiento de los modelos: Análisis descriptivo

Tasa de optimalidad por modelo y número de máquinas



# Rendimiento de los modelos: Análisis descriptivo

Tasa de optimalidad por modelo y número de fábricas



# Rendimiento de los modelos: Inferencia

## Imprescindible

- Clasificar los resultados obtenidos
- Predecir comportamiento de los modelos ante nuevas instancias
- Valorar la importancia de los factores estudiados para predecir la resolubilidad de una instancia

## Técnicas y modelos probados

- GLM
- Boosted LM
- Boosted Tree
- Logistic Model Trees
- **Random Forest**

# Rendimiento de los modelos: RandomForest

## Modelo

- Variable respuesta categórica
  - Si CPLEX ha encontrado la solución óptima o no
- Variables explicativas
  - Número de trabajos a programar
  - Número de fábricas disponibles
  - Número de máquinas a usar
  - Tiempo de computación disponible
  - ~~Número de núcleos disponibles~~
  - Modelo empleado en la computación

Diseño equilibrado

# Rendimiento de los modelos: RandomForest

Máxima precisión con 150 árboles

## Calidad del modelo

■ Error *Out Of Bag*: 4.05 %

■ Error en la validación: 5.44 %

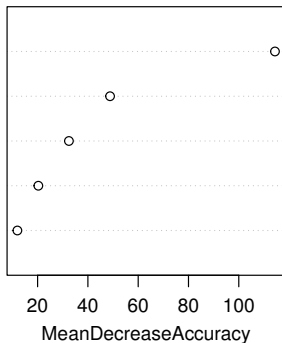
Observ.	Predicción		
	S	N	Error clasif.
S	2630	49	0.01829041
N	104	673	0.13384813

Observ.	Predicción		
	S	N	Error clasif.
S	648	15	0.02262443
N	37	164	0.18407960

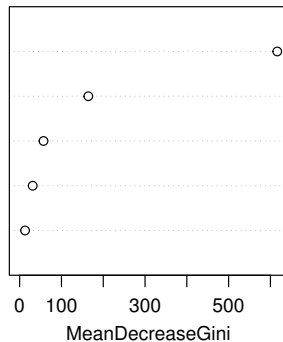
# Rendimiento de los modelos: RandomForest

## Importancia de los factores

n  
modelo  
f  
m  
t\_disponible



n  
modelo  
f  
m  
t\_disponible



# Índice

- 1 The Distributed Permutation Flowshop Scheduling Problem**
  - Formulación del problema
  - Modelos matemáticos
  - Rendimiento de los modelos
  - **Métodos heurísticos**
- 2 The Distributed Assembly Permutation Flowshop Scheduling Problem
- 3 Conclusiones

# Métodos heurísticos

## Utilidad

- Necesarios para resolver instancias grandes
- Encuentran soluciones buenas (no necesariamente óptimas)
- Tiempo y coste computacional muy razonable

## Los tres mejores métodos para DPFSP

- Reglas sencillas
- Método VND
- Método de búsqueda dispersa



# Índice

- 1 The Distributed Permutation Flowshop Scheduling Problem
  - Formulación del problema
  - Modelos matemáticos
  - Rendimiento de los modelos
  - Métodos heurísticos
- 2 The Distributed Assembly Permutation Flowshop Scheduling Problem
  - Formulación del problema
  - Modelos matemáticos
  - Rendimiento de los modelos
  - Métodos heurísticos
- 3 Conclusiones

# Índice

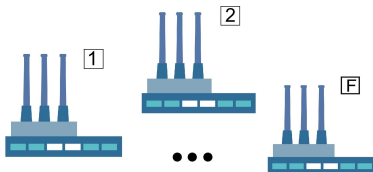
- 1 The Distributed Permutation Flowshop Scheduling Problem
- 2 The Distributed Assembly Permutation Flowshop Scheduling Problem
  - Formulación del problema
    - Modelos matemáticos
    - Rendimiento de los modelos
    - Métodos heurísticos
- 3 Conclusiones

# Formulación del problema

## Motivación

- Combinación de dos problemas de Scheduling
  - Mejores soluciones globales
  - Mayor complejidad computacional

*Fabricación*



*Ensamblaje*



*Elaborado a partir de imágenes vectoriales de freepik*

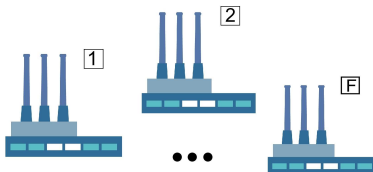
# Formulación del problema

## Dos etapas bien diferenciadas

- Etapa de producción: DPFSP
- Etapa de ensamblaje: AFSP

→ Minimizar  $C_{\text{máx}}$

### *Fabricación*



### *Ensamblaje*



*Elaborado a partir de imágenes vectoriales de freepik*

# Índice

- 1 The Distributed Permutation Flowshop Scheduling Problem
- 2 The Distributed Assembly Permutation Flowshop Scheduling Problem
  - Formulación del problema
  - **Modelos matemáticos**
  - Rendimiento de los modelos
  - Métodos heurísticos
- 3 Conclusiones

# Modelos matemáticos

## Un único modelo construido en la literatura

- 1 Basado en la secuenciación de tareas a partir de la presencia de dummy jobs, que actuarán como separados entre fábricas

# Índice

- 1 The Distributed Permutation Flowshop Scheduling Problem
- 2 The Distributed Assembly Permutation Flowshop Scheduling Problem
  - Formulación del problema
  - Modelos matemáticos
  - Rendimiento de los modelos
  - Métodos heurísticos
- 3 Conclusiones

# Rendimiento de los modelos

**Necesidad de valorar el rendimiento del modelo  
y bajo que circunstancias**



# Rendimiento de los modelos: Planteamiento

$\left[ \begin{array}{l} 108 \text{ problemas diferentes} \\ 5 \text{ instancias por cada tipo} \end{array} \right] \rightarrow 540 \text{ instancias en total}$

Factor del problema	Número de niveles	Valores
Número de componentes a producir	4	4, 8, 12, 16
Número de fábricas disponibles	3	2, 3, 4
Número de máquinas	3	2, 4, 6
Número de trabajos finales	3	2, 3, 4

Tiempos de procesamiento aleatorios, tomados uniformemente sobre el conjunto  $\{1, 2, \dots, 99\}$

# Rendimiento de los modelos: Planteamiento

## Control total de las condiciones de computación

---

<b>CPU</b>	Intel Core i5-750 @2.67GHz
<b>Placa base</b>	Gigabyte P55A-UD4
<b>Memoria Ram</b>	Kingston 8+4GiB @1333MHZ
<b>Swap</b>	<b>40GiB sobre SSD SanDisk Ultra II en SATA3</b>
<b>Sistema Operativo</b>	Ubuntu 16.04 + Kernel 4.13.0-38-generic
<b>Notas</b>	<div> { <div>La computación tiene lugar en tty1 con las X detenidas (<i>service lightdm stop</i>).</div> <div>El swappiness del núcleo de Linux se fija en 10 (<i>sysctl -w vm.swappiness=10</i>).</div> </div>

---

# Rendimiento de los modelos: Planteamiento

Control total de las condiciones de computación

Factor computacional	Número de niveles	Valores
Lanzador	1	R 3.4.4 x86_64-pc-Linux-gnu
Solver	1	CPLEX 12.7.1
Núcleos disponibles	2	3, 4
<b>Tiempo disponible</b>	2	<b>600s, 3600s</b>

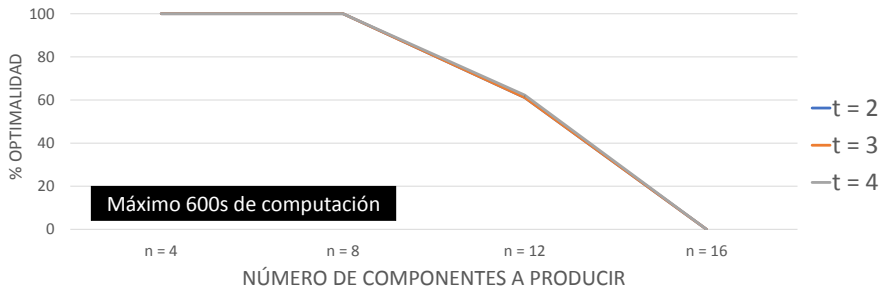
# Rendimiento de los modelos: Planteamiento

## Datos recogidos

- El tamaño del problema
- Las limitaciones computacionales impuestas
- El tiempo de computación dedicado
- Si CPLEX ha encontrado la solución óptima, o no
- El GAP alcanzado por CPLEX en su ejecución

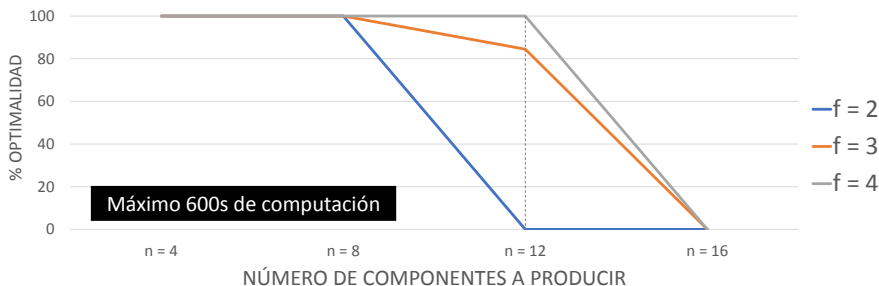
# Rendimiento de los modelos: Análisis descriptivo

Tasa de optimalidad por número de componentes  
y de productos finales



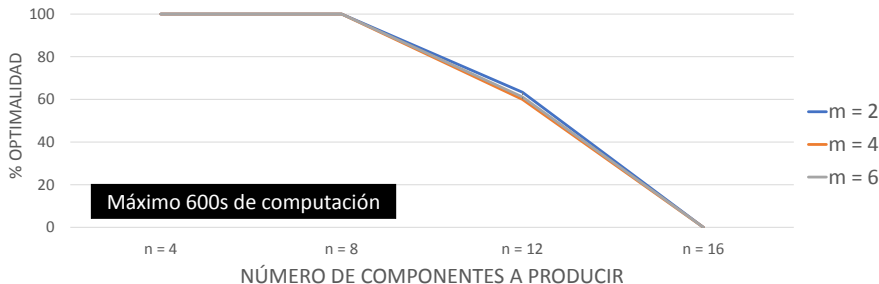
# Rendimiento de los modelos: Análisis descriptivo

Tasa de optimalidad por número de componentes y de fábricas disponibles



# Rendimiento de los modelos: Análisis descriptivo

Tasa de optimalidad por número de componentes  
y de máquinas a usar



# Rendimiento de los modelos: Inferencia

## Imprescindible

- Clasificar los resultados obtenidos
- Predecir comportamiento del modelo ante nuevas instancias
- Valorar la importancia de los factores estudiados para predecir la resolubilidad de una instancia

## Técnicas y modelos probados

- GLM
- Boosted LM
- Boosted Tree
- Logistic Model Trees
- **Random Forest**



# Rendimiento de los modelos: RandomForest

## Modelo

- Variable respuesta categórica
  - Si CPLEX ha encontrado la solución óptima o no
- Variables explicativas
  - Número de componentes a producir
  - Número de fábricas disponibles
  - Número de máquinas a usar
  - Número de productos finales a construir
  - Tiempo de computación disponible
  - Número de núcleos disponibles

Diseño equilibrado

# Rendimiento de los modelos: RandomForest

Máxima precisión con 5 árboles

## Calidad del modelo

■ Error *Out Of Bag*: 4.74 %

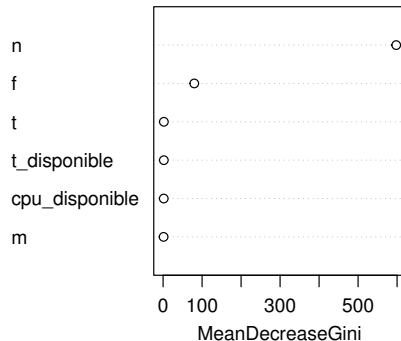
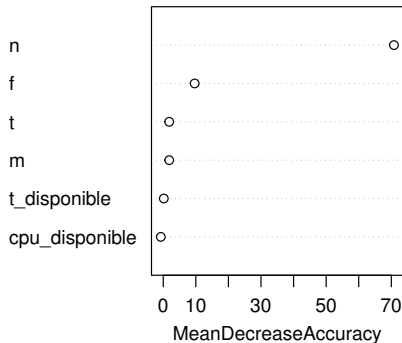
Observ.	Predicción		
	S	N	Error clasif.
S	1012	21	0.02032914
N	53	476	0.10018904

■ Error en la validación: 0.93 %

Observ.	Predicción		
	S	N	Error clasif.
S	287	3	0.01034483
N	1	141	0.00704226

# Rendimiento de los modelos: RandomForest

## Importancia de los factores



# Índice

- 1 The Distributed Permutation Flowshop Scheduling Problem
- 2 The Distributed Assembly Permutation Flowshop Scheduling Problem
  - Formulación del problema
  - Modelos matemáticos
  - Rendimiento de los modelos
  - Métodos heurísticos
- 3 Conclusiones

# Métodos heurísticos

Dos de los mejores métodos para DAPFSP

- Reglas sencillas
- Método VND

# Índice

- 1 The Distributed Permutation Flowshop Scheduling Problem
  - Formulación del problema
  - Modelos matemáticos
  - Rendimiento de los modelos
  - Métodos heurísticos
- 2 The Distributed Assembly Permutation Flowshop Scheduling Problem
  - Formulación del problema
  - Modelos matemáticos
  - Rendimiento de los modelos
  - Métodos heurísticos
- 3 Conclusiones

# Limitaciones

## DPFSP y DAPFSP son una primera aproximación

- DAPFSP omite la etapa de transporte.
- DAPFSP ignora otros tipos de línea de montaje.
- No es realista un buffer intermedio ilimitado.
- Las máquinas no siempre están disponibles.
- Las fábricas suelen ser diferentes entre sí.
- Los tiempos de procesamiento nunca son exactos.

# Trabajo futuro

## Trabajo futuro

- Seguir incorporando elementos a la modelización para hacerla más realista.
- Desarrollar heurísticos más eficaces.



# Aplicaciones de este trabajo

## Aplicaciones de este trabajo

- Facilitar la planificación de los sistemas de producción multifábrica.
- Mejorar la transmisión de conocimientos entre el mundo académico y empresarial.
- Llegar a influir en futuros trabajos de investigación o desarrollo.

# Planificación de la producción en un entorno multifábrica

Juan Luis García Dus  
gardus@alumni.uv.es

Universidad de Valencia  
Av. Blasco Ibañez, 13. 46010 Valencia, España.

12 de julio de 2018